

НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ

УДК 621.38; 681.5

ЦИФРОВИЙ АНАЛІЗАТОР ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Красовський Т. А., Василенко В. І.

Фізико-технічний навчально-науковий центр НАН України

м. Київ, Україна

E-mail: taras@imp.kiev.ua, vasil26139@gmail.com

Для розрахунку оптимального узгодження потужного ультразвукового генератора з п'єзоелектричним перетворювачем необхідно знати параметри еквівалентної електричної схеми заміщення останнього, які визначаються на основі експериментально отриманих значень та амплітудно-частотних (АЧХ) і фазочастотних (ФЧХ) характеристик.

В роботі приведені результати розробки цифрового аналізатора і програми ПК для побудови і аналізу цих характеристик. Створений аналізатор живить підключену до нього ультразвукову коливальну систему синусоїдальною напругою, яка змінює свою частоту в заданих межах, та за допомогою комп'ютера відображує в графічному вигляді АЧХ і ФЧХ, а також визначає основні параметри коливальної системи.

Ключові слова: ультразвук, п'єзоелектричний перетворювач, генератор, аналізатор.

Вступ

Широке впровадження ультразвукових технологій у промислове виробництво та створення високоєфективного конкурентоздатного технологічного обладнання можливе тільки при комплексному підході до проектування ультразвукових апаратів і п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП), а також ультразвукових коливальних систем (УЗКС) в цілому. Такий підхід передбачає побудову амплітудно-частотних і фазочастотних характеристик (АЧХ, ФЧХ) за допомогою цифрових аналізаторів та детальне дослідження основних параметрів УЗКС.

Лідуючу позицію в області цифрового аналізу УЗКС на даний час займає фірма «YHP HEWLETT PACKARD LTD» [1], якою серійно виготовляється амплітудно-фазовий аналізатор імпедансу Нр4194а. Нажаль цей прилад занадто дорогий та надлишково-багатофункціональний. Провідні зарубіжні компанії, лідери ультразвукових технологій – BRANSON, DUKAN (США), TELSONIC (Швейцарія), MECS TECH CO.LTD (Південна Корея), MPI (Швейцарія) використовують ультразвукові аналізатори власних розробок конфіденційно, що вказує на доцільність розробки такого аналізатора в приватному порядку. Відомі також приклади російських розробок подібних аналізаторів для дещо інших цілей [2-4].

При узгодженні ультразвукового генератора з УЗКС потрібні достатньо прості і практичні еквівалентні електричні схеми її заміщення (ЕСЗ), виражені легко вимірюваними еквівалентними елек-

тричними величинами (опір, ємність, індуктивність, напруга і струм) [5]. Важливо знати, які окремі компоненти представляють чисто електричну природу УЗКС, а які – механічну природу, а також як враховувати механічне навантаження та температурний вплив на їх характеристики.

На рис. 1 представлені ЕСЗ із зосередженими параметрами ненавантажених ПЕП, придатні окремо для пари послідовного і паралельного резонансу без врахування теплових витрат в п'єзокерамічних елементах.

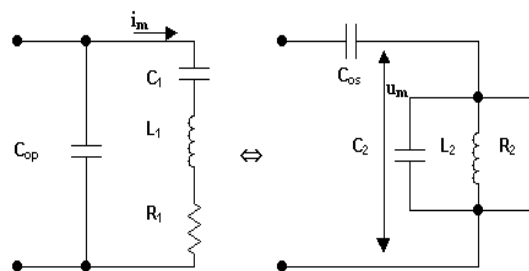


Рис. 1. Еквівалентні схеми заміщення п'єзоперетворювача

Схема (рис. 1) містить наступні елементи: C_{cp} - статична ємність перетворювача, $C1$ - еквівалентна ємність механічної коливальної системи, $L1$ - еквівалентна індуктивність механічного коливального контуру, $R1$ - еквівалентний опір витрат механічного коливального контуру на частоті послідовного резонансу Fs ; Cos - статична єм-

ність перетворювача, C_2 - еквівалентна ємність механічної коливальної системи, L_2 - еквівалентна індуктивність механічного коливального контуру, R_2 – еквівалентний опір втрат механічного коливального контуру на частоті паралельного резонансу F_p .

Постановка завдання

Отримати елементи ЕСЗ можливо за допомогою складних математичних розрахунків та експериментальних досліджень амплітудо-частотних та фазочастотних характеристик, а також з використанням методу електромеханічних аналогій, який полягає в тому, що елементи механічної системи розглядаються як аналоги елементів електричної схеми [6]. Таку електричну схему називають **еквівалентною** даній механічній системі. Розрахунок еквівалентної схеми проводиться по законам аналізу електричних ланцюгів, причому коливальні процеси в них описуються аналогічними рівняннями. Так диференційне рівняння напруги в електричному контурі R, L, C

$$L \frac{dI(t)}{dt} + RI(t) + \frac{1}{C} \int I(t)dt = U(t),$$

де R, L, C – електричний опір, індуктивність і ємність елементів електричного коливального контура, має таку ж саму структуру, як і рівняння руху простого механічного осцилятора:

$$m \frac{dv(t)}{dt} + rv(t) + \frac{1}{c_m} \int v(t)dt = F(t),$$

де m – маса коливальної системи, r – механічний опір, що відображує втрати на тертя, c_m – гнучкість (податливість) механічної системи; коливальна швидкість $v = d\xi(t)/dt$, де $\xi(t)$ – зміщення під дією сили F .

Тому з математичної точки зору, немає різниці між електричною і механічною системами.

Метод електромеханічних аналогій широко використовується при аналізі різних механічних систем, відображає фізичну відповідність процесів в механічній системі і в еквівалентному електричному аналогові. Наприклад, інерція маси перешкоджає миттєвій зміні швидкості при дії (припиненні) сили, так само як і індуктивність перешкоджає миттєвій зміні струму при включенні (виключенні) джерела електрорушійної сили (е.р.с.). Подібно до того, як частина коливальної електричної енергії безповоротно втрачається (перетворюється на теплову енергію) на активному опорі ланцюга, в механічній системі завдяки тертю частина енергії механічних коливань перетворюється на тепло.

Щоб практично використовувати метод електромеханічних аналогій, необхідно, по-перше, визначити графічні зображення механічних елементів коливальних систем і, по-друге, встановити основні відповідності елементів, які приведені в таблиці 1 за даними роботи [6].

Таблиця 1. Система взаємних механічних і електричних аналогів

Механічні характеристики	Одиниці виміру	Електричні характеристики	Одиниці виміру
Сила, F	Н	Е. р. с., U	В
Швидкість, v	м/с	Струм, I	А
Зміщення, ξ	м	Заряд, q	Кл
Маса, m	кг	Індуктивність, L	Гн
Гнучкість, C_m	м/Н	Ємність, C	Ф
Коефіцієнт тертя, r	кг/с	Активний опір, R	Ом
Інерційний опір, ωm	кг/с	Індуктивний опір, ωL	Ом
Пружний опір, $1/\omega C_m$	кг/с	Ємнісний опір, $1/\omega C$	Ом
Механічний імпеданс, z	кг/с	Електричний імпеданс, Z	Ом

Мета даної роботи – розробка і створення цифрового аналізатора АЧХ та ФЧХ як інструмента, необхідного спеціалістам з ультразвукової техніки для побудови реальних характеристик УЗКС та дослідження впливу механічного навантаження і нагріву на зміну її резонансної частоти, імпедансу та фазового зсуву. Дослідна УЗКС має підключатися до генератора гармонійних коливань, який входить до складу аналізатора. Комп'ютерна програма виконає сканування частоти в установлених межах та одержить масиви даних імпедансу та відхилення фази, на базі яких побудуються в графічному вигляді залежності АЧХ та ФЧХ.

За допомогою цифрового аналізатора необхідно:

- детально дослідити найбільш важливі ЕСЗ із зосередженими параметрами, зручні для представлення УЗКС при послідовному або паралельному резонансі;
- порівняти акустичну потужність і втрати УЗКС на послідовному і паралельному резонансах;
- визначити фазові відхилення АЧХ та ФЧХ під впливом механічного навантаження та температури на роботу УЗКС, що в свою чергу дозволить більш детально розрахувати алгоритм роботи цифрової ФАПЧ ультразвукового генератора.
- при розробці програми ПК потрібно врахувати універсальність використання, як автономного приладу, так і в якості базового ядра системи цифрового керування ФАПЧ ультразвукового ге-

нератора. За допомогою комп'ютера, підключеного до ультразвукового генератора, навантаженого на реальну УЗКС, можна буде оптимізувати їх погодження.

Склад та алгоритм роботи створеного аналізатора

На рис. 2 зображена структурна схема розробленого цифрового аналізатора, до складу якого входять:

- ПК – персональний комп'ютер для керування, математичної обробки даних та графічного відображення результатів,
- МПК – мікропроцесорний контролер для вимірювання фази та імпедансу,
- ЦСЧ – цифровий синтезатор частоти,
- ФД – фазовий детектор,
- ПП – підсилювач потужності,
- Компаратор,

- ФНЧ – фільтр нижніх частот і прицевий випрямляч,
- ППС – підсилювач постійного струму,
- Джерело живлення.

Послідовність дій з аналізатором:

1. Дослідний ПЕП (УЗКС) підключається до виходів А і С;
2. У вікні програми ПК вводяться інтервали сканування досліджуваної частоти та її дискретність;
3. По команді «Старт» програма ПК передає по каналу USB\RS485 дані в МПК для налагодження роботи синтезатора;
4. В процесі сканування програма ПК візуально відображує в графічному режимі ФЧХ та АЧХ, обчислює частоти послідовного і паралельного резонансів, добротність та активний опір механічних втрат ПЕП.

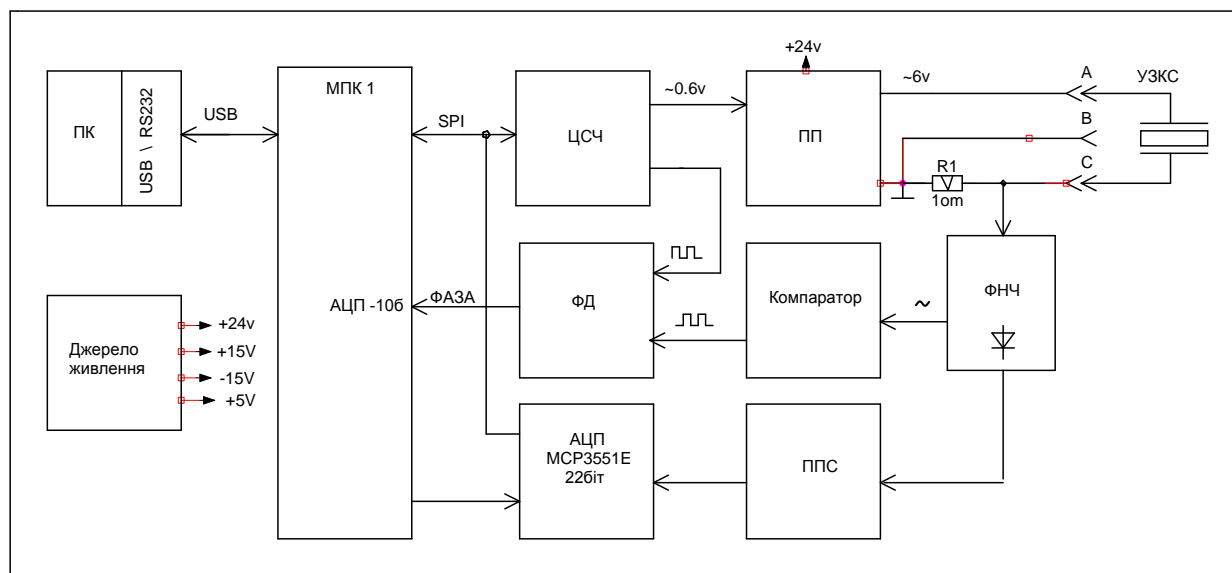


Рис. 2. Структурна схема цифрового аналізатора

Цифрова частина мікропроцесорного електронного модуля синтезу частоти та фазових і амплітудних вимірювань виконана на базі мікропроцесорного контролера фірми MICROCHIP PIC16F887 [7]. Зв'язок із зовнішніми сумісними пристроями та ПК виконується по каналу RS232 (RS485) через перетворювач RS/USB. Генерування змінної частоти в заданих межах, які вводяться з вікна комп'ютерної програми, проводиться за допомогою цифрового синтезатора частоти DDS AD9834 [8] по інтерфейсу SPI командами МПК.

Інтегральна мікросхема DDS являє собою компактний і мало споживаючий пристрій, який може генерувати сигнал з частотою від 0.2 Гц до 400 МГц при частоті тактового сигналу 1 ГГц, з роздільною здатністю до 48 bit. Низька ціна та високі показники якості і можливість цифрового управління – все це разом робить аналізатор з ви-

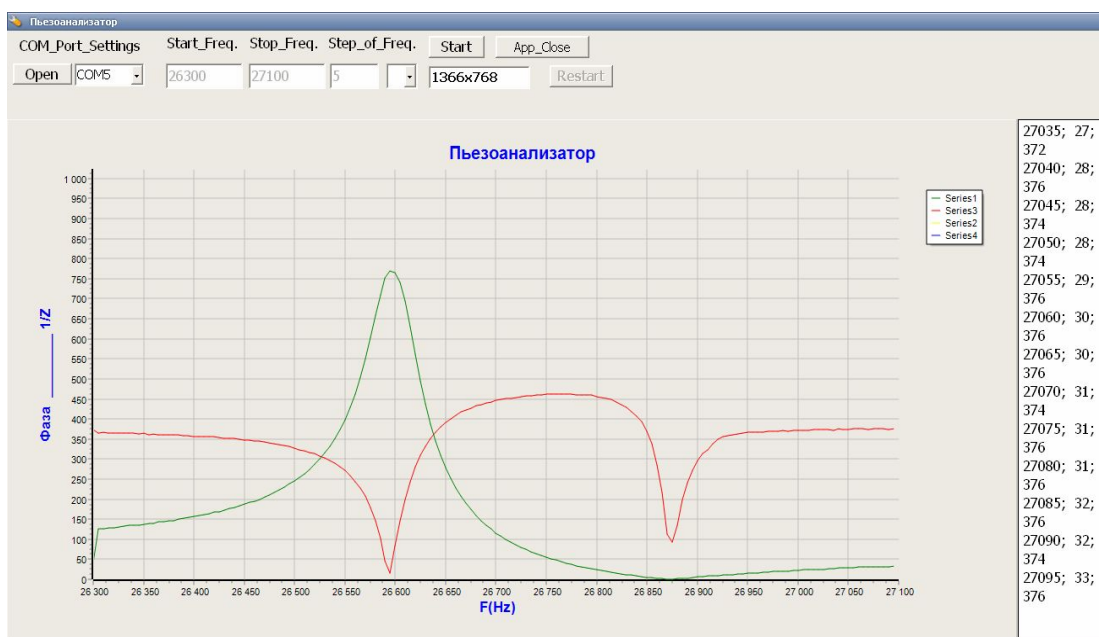
користанням DDS надзвичайно простим рішенням в порівнянні з традиційними підходами проектування цифрових систем на базі схем перепрограмованої логіки ПЛИС з використанням мови VHDL.

Значення фази на виході фазового детектора в аналоговому вигляді, вимірюється внутрішнім аналого-цифровим перетворювачем МПК. Провідність УЗКС на послідовному та паралельному резонансах вимірюється як напруга на сенсорному опорі 1 Ом при незмінній амплітуді напруги генератора (6В) з малим внутрішнім опором за допомогою сігма-дельта АЦП - МСР3551Е з роздільною здатністю 22 біт [9]. По цим даним (провідність, напруга) комп'ютер обчислює еквівалентний опір втрат механічного коливального контуру на частотах послідовного та паралельного резонансів — F_s , F_p .

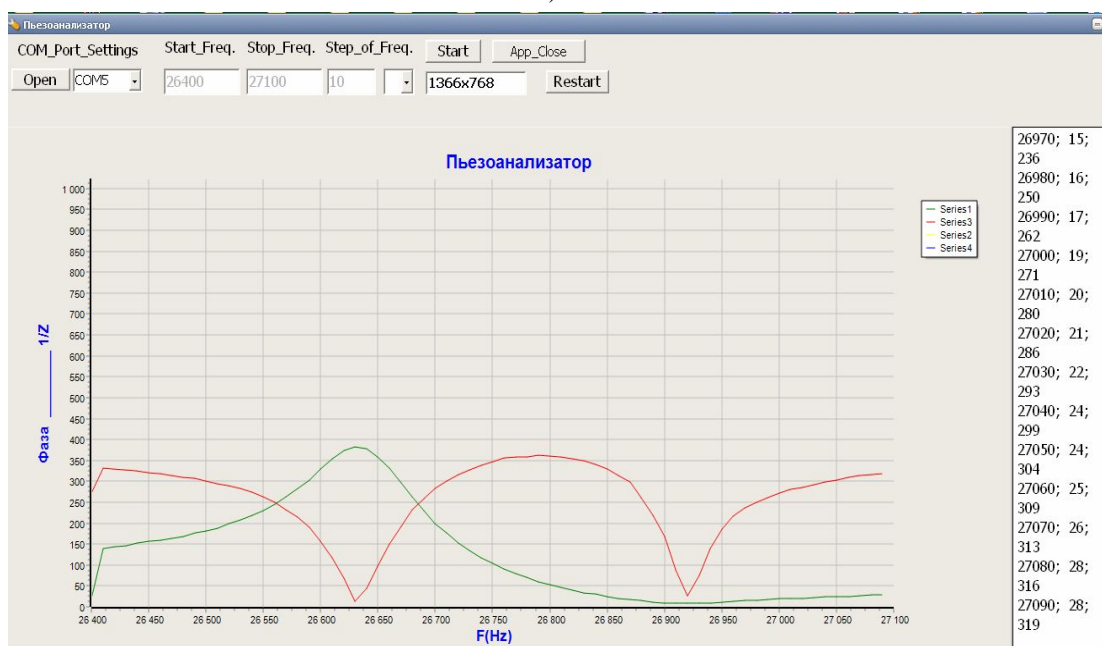
На рис. 3 а,б зображено АЧХ та ФЧХ дослідної УЗКС до та після механічного навантаження. Крива 1 – залежність провідності від частоти, а крива 2 – залежність фазового зсуву (в межах 180°) від частоти. Цифри 1, 2 вказують на екстремуми провідності і фази на частоті послідовного резонансу, а 3 – на частоті паралельного резонансу, де провідність мінімальна з нульовим зсувом фази. Вісь ординат проградуєвана в умовних одиницях вхідної напруги 10-розрядного АЦП.

При дослідженні роботи УЗКС, важливо враховувати присутність паразитних резонансів в ши-

рокій смузі частот, що показані на рис. 4. Вони значно впливають на збільшення втрат корисної енергії ультразвукових пристроїв. Відповідно до призначення УЗКС проектується для роботи на частоті одного резонансу – послідовного або паралельного. Всі зайві паразитні резонанси мають бути усунені. АЧХ та ФЧХ, побудовані за допомогою цифрового аналізатора, дають можливість визначати частоти цих резонансів та розраховувати елементи узгоджуючого фільтра в вихідному каскаді ультразвукового генератора.



а)



б)

Рис. 3. Зміна АЧХ і ФЧХ УЗКС під дією механічного навантаження, де: а – до механічного навантаження, б – після механічного навантаження

Технічні характеристики аналізатора:

- Діапазон сканування частоти від 100 Hz до 100KHz
- $|Z|$, R , X від 1 Ом до 0,5 МОм
- Швидкість сканування від 1 mS до 10 S
- Діапазон виміру фази +/- 180 (0,1-4В)
- Добротність Q від 1 до 5000.

Аналізатор зібраний на друкованій платі і вставлений в пластмасовий корпус розміром 200x140x50 мм.

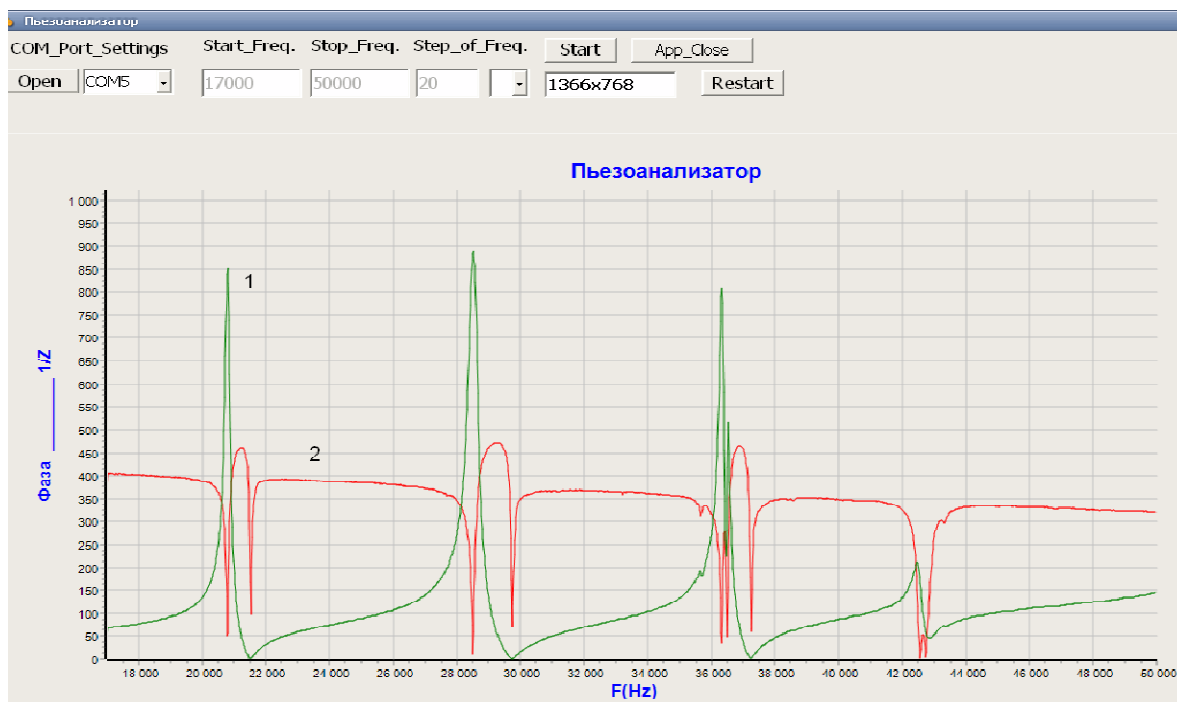


Рис. 4. Загальний вигляд АЧХ та ФЧХ УЗКС при скануванні частоти в широких межах. Криві: 1 – провідність ПЕП, 2 – фаза струму

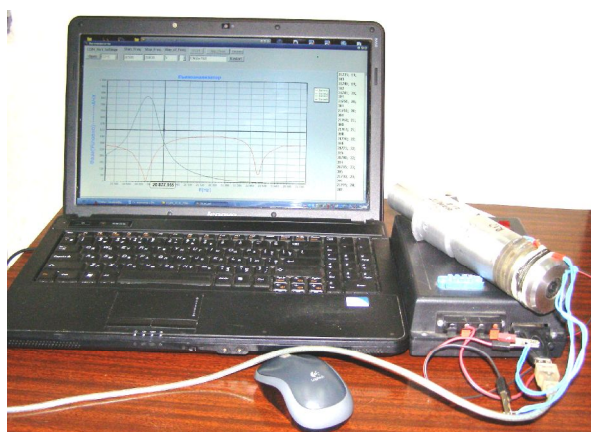


Рис. 5. Зовнішній вигляд цифрового аналізатора

Висновки

Розроблений цифровий аналізатор електро-механічних параметрів УЗКС дав можливість в зручному для розрахунків графічному вигляді досліджувати:

- найбільш важливі параметри еквівалентних схем заміщення УЗКС;

- детально розглядати дослідні зони за допомогою масштабування графічних зображень при послідовному або паралельному резонансі;
- порівнювати втрати акустичної потужності УЗКС на послідовному і паралельному резонансах;
- визначити вплив механічного навантаження та температури на фазові відхилення ФЧХ і на АЧХ УЗКС при розробці алгоритмів роботи цифрової ФАПЧ ультразвукового генератора.

Аналізатор може використовуватися для виміру та аналізу параметрів ультразвукових коливальних систем будь-яких потужностей та різного призначення (ультразвукова мийка, зварювання пластмас, фінішна обробка металів і т.п.).

Література

1. www.testequipmentdepot.com/hewlettpackard/impedanceanalyzers/4194a.htm
2. Барсуков Р. В. Прибор для измерения параметров ультразвуковых колебательных систем / Р. В. Барсуков, Е. В. Ильченко, Д. С. Абраменко // Сборник докладов Всероссийской конференции ИАМПИ-2010. – Бийск. – 2010. – С. 115.

3. Воронцов А. В. Прибор для исследования амплитудно- и фазочастотных характеристик (АЧХ). // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – №6. – С. 224 – 227.
4. Дьяконов В. Построитель АЧХ – осциллограф или анализатор спектра // Компоненты и технологии. – 2010. – №12. – С. 159

5. Prokic Miograd. Piezoelectric transducers modeling and characterization.// MPI. – Switzerland. – 2004. – 266 pages.
6. Фурдуев В. В. Электроакустика // М. – Л. – 1948.
7. www.microchip.com/ PIC16F887. PDF.
8. www.analog.com/ AD9834. PDF.
9. www.microchip.com/ MCP3551E. PDF.

УДК 621.38; 681.5

Т. А. Красовський, В. І. Василенко

Фізико-технічний навчально-науковий центр НАН України, г. Київ, Україна

ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗАТОР ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Для расчета оптимального согласования мощного ультразвукового генератора с пьезоэлектрическим преобразователем необходимо знать параметры эквивалентной схемы замещения последнего, которые можно получить, анализируя амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристики преобразователя. Данная работа посвящена разработке цифрового анализатора и программы ПК для построения и анализа этих характеристик. Созданный анализатор питает подключенную к нему исследуемую ультразвуковую колебательную систему гармоническим напряжением, частота которого изменяется в заранее заданных пределах, отображает в графическом виде АЧХ и ФЧХ, а также вычисляет основные параметры преобразователя.

Ключевые слова: ультразвук, цифровой анализатор, пьезоэлектрический преобразователь, колебательная система, генератор.

T. A. Krasovsky, V. I. Vasilenko

Physics - technical educational-scientific center of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

DIGITAL ANALYZER OF ELECTROMECHANICS PARAMETERS OF AN ULTRASONIC OSCILLATING SYSTEMS

For calculate the optimal concordance of powerful ultrasonic generator with a piezoelectric transformer it is necessary to know the parameters of equivalent chart of substitution last, that can be got analyzing amplitude-frequency (AFC) and phase- frequency (PFC) descriptions of the transformer. This work is sanctified to development of digital analyzer and program for personal computer on construction and analysis of these descriptions. The created analyzer feeds connected to him ultrasonic oscillating system, at the same time scans frequency in the beforehand set limits, represents AFC and PFC in the graphic type, and also calculates the most essential parameters of the transformer.

Keywords: ultrasonic, digital analyzer, piezoelectric transformer, oscillating system.

*Надійшла до редакції
19 грудня 2016 року*

*Рецензовано
27 грудня 2016 року*

© Красовський Т. А., Василенко В. І., 2017

УДК 620.179.14

ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТИ УЯВНО-РЕАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ МЕЖОВОЇ ПАНДАННОЇ ЗОНИ ОБ'ЄКТА. Частина 1. ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ

Скицюк В. І., Клочко Т. Р.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

E-mail: klochkotr@gmail.com

Розроблено аналітичні моделі визначення координати поверхні абстрактного об'єкта за допомогою аналізу панданних зон об'єктів, що взаємодіють у просторі, отже, саме у цій зоні взаємодії важливо знати переміщення маси та її просторово-часові координати.